

mgr inż. Piotr Gawąd  
dr inż. Adam Nowarski  
mgr inż. Krzysztof Marzencki  
Centrum Badawcze ABB

## KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE POPRAWY JAKOŚCI DYSKRETNYCH PROCESÓW WYTWARZANIA

*W pracy przedstawiono możliwość zastosowania komputerowego systemu SPC (ang. Statistical Process Control) do statystycznej poprawy procesów wytwarzania. Artykuł zawiera omówienie podstaw teorii statystycznego sterowania procesami oraz praktyczne zastosowanie własnego (ABB) komputerowego systemu SPC opracowanego dla produkcji silników elektrycznych niskiego napięcia w jednej z fabryk firmy ABB.*

### COMPUTER BASED SYSTEM FOR THE QUALITY IMPROVEMENT OF DISCRETE MANUFACTURING PROCESSES

*Nowadays computer applied methods are widely used in discrete manufacturing processes in order to improve the product and process quality. In this paper authors present abilities of computer based Statistical Process Control (SPC) System for quality improvement of discrete manufacturing processes. This paper includes description of the basics of statistical process control theory as well as practical implementation of this system based on low voltage motors manufacturing process in one of ABB factories.*

#### 1. WSTĘP

W procesach wytwarzania wykorzystuje się często skomplikowane i złożone technologie. Aby osiągnąć pożądaný wynik w postaci produktu o wysokiej jakości, należy w procesach tych kontrolować jednocześnie wiele parametrów. Prowadzi to do potrzeby stosowania w sposób systematyczny nowoczesnych narzędzi jakościowych takich jak: Six Sigma, planowanie eksperymentu, statystyczne sterowanie procesami, itp.

Nowoczesne podejście jakościowe do procesów wytwarzania stwierdza, że produkt musi być wyprodukowany poprawnie (tzn. muszą być uzyskane żądane cechy (parametry) produktu za pierwszym razem) przy jednoczesnym minimalnym nakładzie kosztów na jego wytworzenie. Wykazuje się, że warunek ten jest tożsamy z warunkiem uzyskania tzw. procesów typu „robust”, dla których poszukuje się takich ustawień

parametrów sterujących procesami, aby otrzymać żądane wartości cech wielkości na wyjściu, z jednoczesną minimalizacją wpływu czynników zakłócających (nieudających się sterować) te procesy. [1]

Powyższe stwierdzenie wskazuje, że procesy wytwarzania muszą być stabilne statystycznie, i że wszystkie osoby zaangażowane w produkcję (włączając: operatorów, inżynierów, projektantów, zarząd) muszą nieustannie poszukiwać nowych kierunków poprawy jakości tych procesów wraz z redukcją zmienności kluczowych parametrów procesów. Komputerowe systemy statystycznego sterowania jakością procesów (SPC) są podstawowymi narzędziami dla osiągnięcia tego celu.

## 2. ZMIENNOŚĆ PROCESU (IDEA SPC)

Pierwszym etapem mającym na celu poprawę jakości procesów jest określenie ich aktualnej zmienności. Ponieważ żaden proces nie przebiega w warunkach idealnych, tzn. nie jest odizolowany od zewnętrznych zakłóceń, dlatego też, nigdy nie udaje się uzyskać dwóch identycznych wyników pomiarów. Innymi słowy nie da się np. wyprodukować dwóch wyrobów o identycznych wartościach swoich cech. Jako skutek obecności różnego rodzaju zakłóceń rozróżnia się tzw. zmienność naturalną (powodowaną przez tzw. zakłócenia losowe) oraz zmienność specjalną (powodowaną przez tzw. zakłócenia specjalne).

Wyznaczenie aktualnej zmienności procesu polega na wykonaniu pomiarów wielkości wyjściowych dla kolejnych wyrobów o identycznych cechach (np. dla takich samych wartości nominalnych), a następnie określeniu granic, w których powinien mieścić się proces w przypadku, gdy oddziałują na niego jedynie zakłócenia losowe. Dzięki określeniu „naturalnego” zachowania się procesu (znając granice losowej zmienności procesu), można rozpocząć prace nad likwidowaniem (bądź też minimalizacją) wpływających na niego zakłóceń specjalnych. Do wyeliminowania wpływu zakłóceń specjalnych potrzebne jest zastosowanie metody, która pozwoliłaby je właściwie zidentyfikować. Pomocne w tym jest podstawowe narzędzie SPC tzw. karta kontrolna.

Natychmiastowa analiza zmienności procesu przeprowadzona na bazie kart kontrolnych pozwala wykryć obecność specjalnych przyczyn zmienności oraz zapoczątkować działania w celu zidentyfikowania źródeł tych przyczyn. Po wprowadzeniu zmian w procesie karty kontrolne mogą również zweryfikować skuteczność podjętych działań. [2]

## 3. KARTY KONTROLNE

Karta kontrolna [3] w swojej najprostszej postaci przedstawia dwa wykresy, które odzwierciedlają zachowanie się monitorowanego parametru. Na jej podstawie możemy ocenić, czy przebiega on prawidłowo, czy też może być zakłócony zakłóceniami specjalnymi wymaga naszej ingerencji. Na wykresie tym zawsze znajdują się cztery podstawowe linie: górna i dolna granica kontrolna, linia centralna oraz przebieg mierzonej cechy (parametru). Linia centralna przedstawia wartość średnią ze wszystkich umieszczonych na karcie kontrolnej wyników. Granice kontrolne – wyznaczane na

podstawie odchylenia standardowego całego procesu – pokazują obszar, w jakim powinny się mieścić wartości obserwowanych charakterystyk dla ustabilizowanego i poprawnie przebiegającego procesu. Poszczególne punkty to albo bezpośrednio zmierzone wartości pojedynczych wyników pomiarów, albo też wartości średnie otrzymane z wieloelementowych próbek.

W opracowanym komputerowym systemie SPC (z uwagi na specyfikę istniejących procesów produkcyjnych) zastosowano następujące typy kart kontrolnych:

- Karta kontrolna *IX – MR*

Na karcie tego typu monitoruje się miarę położenia oraz miarę zmienności (rozproszenia). Miarą położenia są pojedyncze pomiary wybranej właściwości produktu (karta *IX*, indywidualne *X*). Miarą zmienności są tzw. ruchome rozstępy (karta *MR*, ang. Moving Range)

- Karta kontrolna *X-średnie – R* (rozstęp)

Przy użyciu karty tego typu analizuje się również dwie wartości: wartość średnią - miarę położenia (oznaczoną symbolem *X-średnie*) oraz rozstęp - miarę zmienności (oznaczoną przez *R*) wyników w poszczególnych próbkach.

- Karta kontrolna *X-średnie – S* (odchylenie standardowe)

Karta bardzo podobna do karty *X-średnie – R*. Na karcie tego typu monitoruje się wartości średnie w poszczególnych próbkach oraz miarę rozproszenia poprzez przedstawienie wartości odchylenia standardowego w pobieranych do kontroli próbkach.

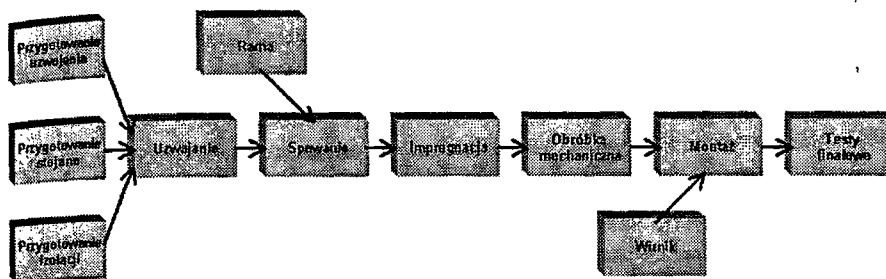
#### 4. PROCES PRODUKCJI SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH

Przedstawiona powyżej technika została zastosowana w procesie wytwarzania silników elektrycznych niskiego napięcia jednej z fabryk firmy ABB. Dzięki jej zastosowaniu osiągnięto znaczącą redukcję zmienności parametrów sterujących tym procesem, co zostało również wyrażone poprzez obniżenie kosztów złej jakości związanych z tym typem produkcji (o ok. 50 %).

Ogólna mapa procesu, o którym mowa wyżej została przedstawiona na rysunku nr 1. Każdy z tych etapów produkcyjnych jest charakteryzowany poprzez zestaw parametrów opisujących jakość wytwarzanego komponentu. Mogą to być zarówno parametry samego komponentu (wymiary, właściwości elektryczne, mechaniczne itp.), jak również parametry urządzeń pracujących na poszczególnych etapach (ustawienia maszyn, realizacja tych ustawień itp.).

Najważniejsze parametry opisujące poszczególne etapy są analizowane przy pomocy kart kontrolnych. Ponieważ omawiany powyżej proces jest „dyskretnym” procesem produkcyjnym, dlatego też dane (pomiary, wartości parametrów) są ściśle związane z typem komponentu, jak również z samym komponentem (można analizować wartości parametrów dla identycznych typów – tzn. dla takich samych wartości nominalnych).

Pośrednim celem zastosowania systemu SPC do tego procesu była redukcja wysokich kosztów złej jakości (ang. Cost of Poor Quality, COPQ) generowanych podczas tego procesu, osiągnięta poprzez redukcję zmienności parametrów produkcyjnych na poszczególnych etapach wytwarzania.



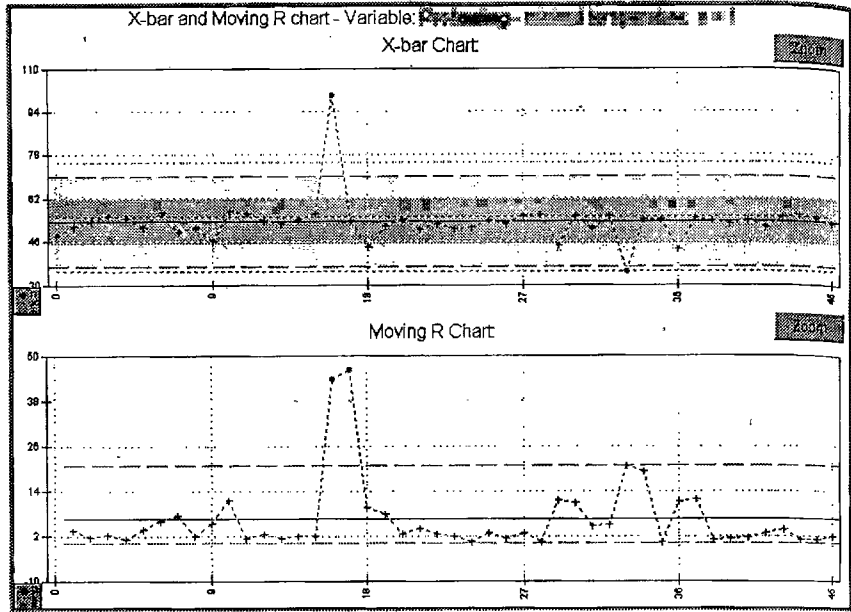
Rys. 1. Mapa procesu wytwarzania silników elektrycznych niskiego napięcia

## 5. ANALIZA WYNIKÓW

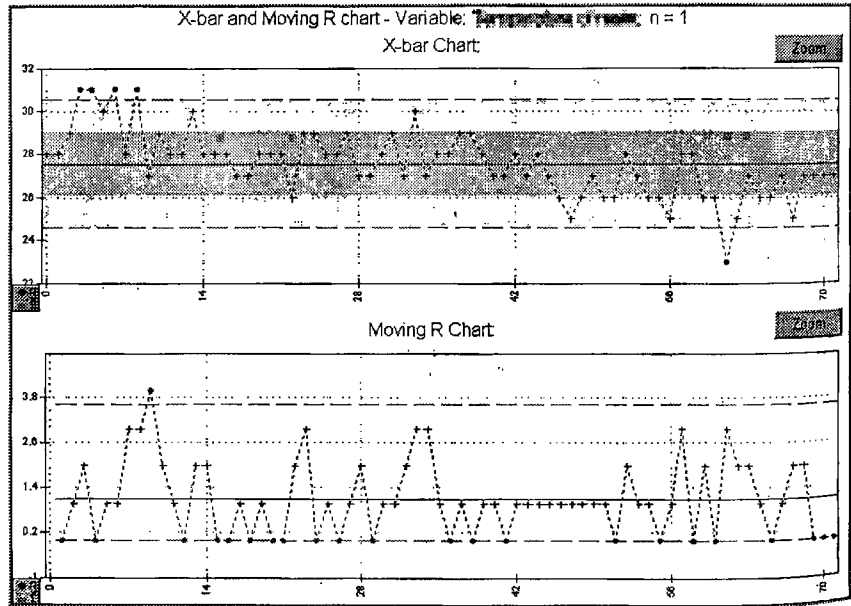
Przedstawione poniżej wyniki oraz ich analiza zostały przeprowadzone dla jednego typu silnika. Ze względu na ograniczoną wielkość artykułu zostały zaprezentowane jedynie wybrane wyniki.

### 5.1. Typowa obecność specjalnej przyczyny zmienności (zakłócenia specjalnego)

Poniższa karta kontrolna (rys. 2) pokazuje typową obecność specjalnej przyczyny zmienności. Na wykresie wartości średniej (wykres górny), jak również na karcie rozstępu (wykres dolny) zaznaczone są punkty świadczące o nieprawidłowym przebiegu procesu (punkty wykraczające poza granice kontrolne). W chwili ich zaobserwowania analiza, polegająca na odnalezieniu źródła tych przyczyn (zidentyfikowania zakłócenia) została rozpoczęta, a następnie po odnalezieniu rozwiązania podjęte decyzje oraz związane z nimi zmiany w procesie pozwoliły na ponowne statystyczne ustabilizowanie tego parametru.



Rys. 2. Typowa obecność specjalnej przyczyny zmienności (etap: uzwajanie)



Rys. 3. Systematyczne zmniejszanie wartości parametru (etap: impregnacja)

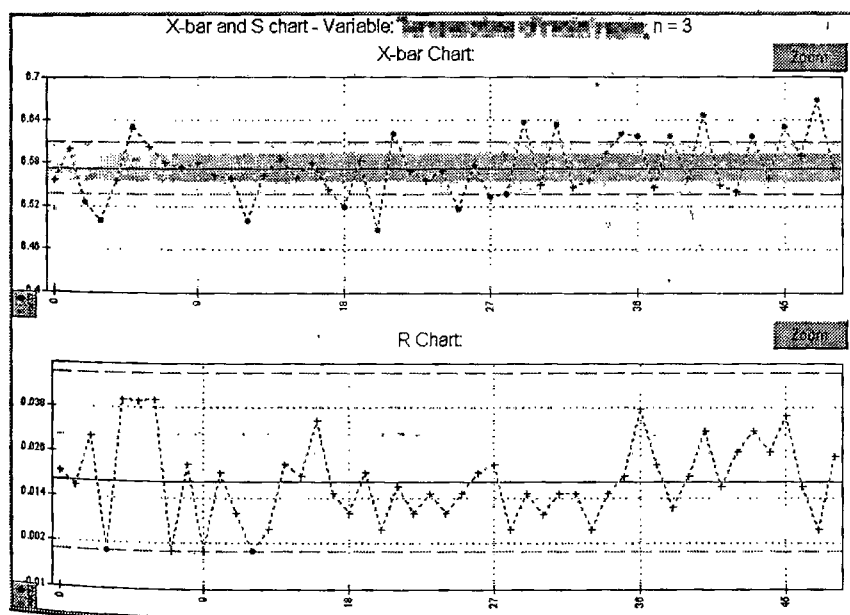
## 5.2. Systematyczne zmniejszanie wartości parametru

Powyższy przykład (rys. 3) przedstawia systematyczne zmniejszanie wartości parametru spowodowane przez małe i trudne do wykrycia zakłócenia. Jak widać z przebiegu wykresu do momentu przekroczenia dolnej granicy kontrolnej nie zaobserwowano żadnej reakcji ze strony operatora. Dopiero po przekroczeniu dolnej granicy kontrolnej podjęte zostały odpowiednie akcje stabilizujące wartość średnią parametru.

## 5.3. Nieprawidłowy przebiegu procesu (karta $\bar{X}$ -średnie - R)

Kolejna karta (rys. nr 4) również przedstawia nieprawidłowy przebiegu procesu. Karta „rozstępów” (dolny wykres – karta R) informuje nas o „rozrzucie” wyników obliczanych w każdej próbkce osobno. Z kolei wykres górny (mira położenia – karta  $\bar{X}$ -średnie) obrazuje wartość średnią analizowanego parametru (także obliczaną dla próbkki).

Na poniższym wykresie jeden punkt reprezentuje jeden komponent (np. jeden stojan silnika). Jak widać zmienność analizowanego parametru w zakresie jednego komponentu jest bardzo mała (w tym przypadku mamy do czynienia z próbką trzelementową), z kolei patrząc na kolejne komponenty (kolejne punkty na wykresie górnym) widać, że zmienność procesu z komponentu na komponent jest zdecydowanie większa i dla tak przyjętego punktu odniesienia proces wykazuje cechy niestabilności statystycznej.

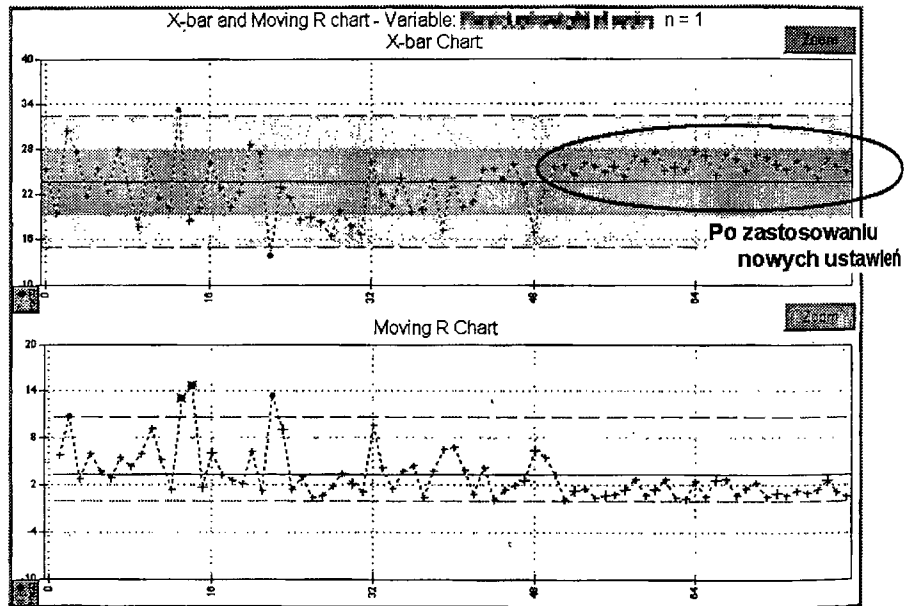


Rys. 4. Nieprawidłowy przebiegu procesu dla karty kontrolnej  $\bar{X}$ -średnie – R

### 5.3. Redukcja zmienności procesu dzięki zastosowaniu techniki planowania eksperymentów

Przykład karty kontrolnej na rysunku nr 5 prezentuje zastosowanie techniki planowania eksperymentów (DOE, ang. Design of Experiments) [4, 5] dla celów znalezienia optymalnych ustawień procesu w takim znaczeniu, że wymagana wartość odpowiedzi procesu (jako wartość średnia) jest osiągnięta oraz równocześnie następuje znacząca redukcja zmienności jej wartości (reprezentowane przez np. odchylenie standardowe).

Technika planowania eksperymentów pozwoliła (dzięki odpowiedniemu zaplanowaniu, a następnie przeprowadzeniu eksperymentu) określić związek parametrów sterujących etapem impregnacji stojanów na wybraną wielkość wyjściową, jaką była w tym przypadku waga żywicy w stojanie po impregnacji. W tym przypadku analiza statystyczna wyników eksperymentu pozwoliła na znalezienie takich ustawień parametrów wejściowych by odpowiednia wartość wagi żywicy po etapie impregnacji była osiągnięta (tzn. 26 kg – rys. nr 5 górny wykres) oraz odchylenie standardowe tej odpowiedzi było minimalne (redukcja zmienności – rys. nr 5 dolny wykres).

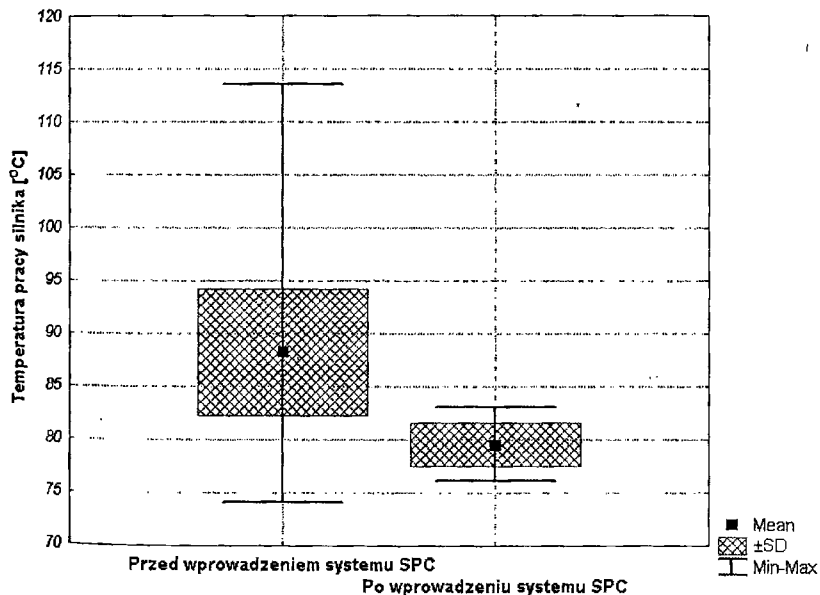


Rys. 5. Zastosowanie techniki planowania eksperymentów do redukcji zmienności procesu (parametr z etapu: impregnacja)

## 6. WNIOSKI KOŃCOWE

Zastosowany system SPC do poprawy jakościowej „dyskretnego” procesu wytwarzania silników elektrycznych niskiego napięcia oraz przeprowadzona przy jego pomocy analiza wyników pomiarów pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- Komputerowy system SPC daje możliwość ciągłego monitorowania parametrów procesów produkcyjnych, co z kolei pozwala wymuszać szybką reakcję ze strony operatorów i w ten sposób zapobiegać mogącym powstać problemom jakościowym.
- Zastosowany system SPC do procesów dyskretnych potwierdza swą użyteczność w stabilizacji statystycznej parametrów procesów produkcyjnych.
- System SPC pozwala w sposób prosty i przejrzysty sprawdzić efektywność podjętych zmian w procesie.
- Zostało wykazane, że redukcja zmienności poszczególnych parametrów procesu produkcyjnego jest ściśle związana z równoczesną redukcją kosztów złej jakości (COPQ).
- Systematyczna redukcja zmienności parametrów procesów i eliminacja specjalnych przyczyn zmienności na ich kolejnych etapach prowadzi również do redukcji zmienności parametrów opisujących gotowy produkt (rys. 6).



Rys. 6. Redukcja zmienności parametru „temperatura pracy silnika” (mierzonego podczas testów końcowych)



Trzeba jednak zaznaczyć, że pomimo niewątpliwych zalet i użyteczności, sam system SPC jako taki nie byłby w stanie podnieść poziomu jakości produkcji (zredukować zmienność) omawianego procesu wytwarzania. Jak każdy program komputerowy jest tylko narzędziem, które ma pomagać i ułatwiać pracę użytkownikom (pomoc w podejmowaniu decyzji). Jednakże umiejętnie stosowany i wykorzystywany potrafi być idealnym narzędziem dla zastosowań mających na celu poprawę jakości.

#### Literatura:

- [1] Breyfogle Forrest W., *Implementing Six Sigma, smarter solutions using statistical methods*. New York 1999.
- [2] Montgomery Douglas C., *Introduction to statistical quality control*. New York 1997.
- [3] Greber Tomasz, *Statystyczne sterowanie procesami – doskonalenie jakości z pakietem Statistica*. Kraków 2000.
- [4] Polański Zbigniew, *Metodyka badań doświadczalnych*. Politechnika Krakowska, 1978.
- [5] Myers R. H., Montgomery D. C., *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1995.